

Opinnäytetyö (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

2018

Susanna Jokioinen

3D CAD/CAM -OHJELMISTON KÄYTTÖÖNOTTO

Salomaan Konepaja Oy

Susanna Jokioinen

3D CAD/CAM -OHJELMISTON KÄYTTÖÖNOTTO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli kehittää koneistettavien kappaleiden tuotantoprosessia Salomaan Konepajassa ottamalla käyttöön 3D CAD/CAM -ohjelmisto NC-työstökeskuksessa ja -sorvissa. Uusille tuotteille haluttiin saada pienempi läpimenoaika ja nopeampi tuotannon aloitus ohjelmiston avulla. Lisäksi haluttiin saada tukea tarjouslaskentaan. Ennen käyttöönottoa tehtiin huolellinen selvitystyö oikean ohjelmiston valitsemiseksi. Valinnan merkittävin tekijä on löytää yhteensopiva kokonaisuus yrityksen käytössä olevan konekannan, CAD/CAM-ohjelmiston ja yrityksen koneistustöiden välillä. Käyttöönoton yhteydessä ohjelmistoon asennettiin ylimääräinen postprosessori ja molemmille työstökoneille tehtiin työkalukirjastot. Työstökoneisiin asennettiin vakiotyökalut näiden tietojen pohjalta. Lopuksi työstökoneet kytkettiin Ethernet-verkkoon.

Työ toteutettiin Autodesk Inventor -suunnitteluohjelmistoon integroidulla HSM CAM -lisäosalla, joka otettiin käyttöön HAAS VF-4 -koneistuskeskuksessa ja HAAS ST-30Y -sorvissa. HSM CAM -ohjelmistoon kuuluu lisäksi erillinen HSM Editor -ohjelma, joka on tarkoitettu käytettäväksi postprosessorilla käännettyjen NC-koodien muokkaamiseen.

Käyttöönotto aloitettiin Autodesk Inventor -ohjelmiston ja HSM CAM -lisäosan asennuksella. Asennuksen jälkeen ohjelmiston työkalukirjastoihin määritettiin koneissa käytettävien työkalujen ja työkalupitimien mitta- ja geometriatiedot sekä työstöarvot. Ensimmäisessä testausvaiheessa ohjelmistolla suoritettiin testiohjelmiä jo tuotannossa olevista tuotteista. Näin CAM:illa tehtyjä koneistusohjelmia voitiin verrata olemassa oleviin ohjelmiin ja varmistua geneeristen postprosessorien oikeellisuudesta. Toisessa testausvaiheessa ohjelmistolla tehtiin neljä ohjelmaa koneistuskeskukselle ja neljä ohjelmaa sorville tuotantokäyttöä varten. Kaikkia testiohjelmiä ajettiin myös sarjatuotannossa. Käyttöönoton viimeisessä vaiheessa työstökoneet liitettiin Ethernet-verkkoon ja 3D CAD/CAM -ohjelmoinnista tehtiin prosessikuvaus Salomaan Konepajalle.

Työn tuloksena Salomaan Konepajalla on käytössään nykyaikainen 3D CAD/CAM -ohjelmisto, jonka toimivuutta testattiin tuotantokäytössä. Käyttöönotto oli onnistunut, sillä ohjelmistolla saatiin aikaiseksi toimivia koneistusohjelmia. Koneistustöiden ohjelmointi nopeutuu CAM-ohjelmistolla ja saavutetaan pienemmät läpimenoajat. Samalla uusien tuotteiden tuotannon aloitus nopeutuu. Tuotteiden tarkkuus paranee ja päästään vaativiin toleransseihin. Koneistusprosessit tehostuvat jatkossa entisestään, kun ohjelmiston toimintoihin perehdytään ja koulutaudutaan lisää. Näin CAM-ohjelmiston avulla kyetään antamaan tarkempia tarjouksia sekä vastaamaan etenkin piensarjatuotannossa asiakkaan tarpeisiin joustavasti ja nopeasti.

ASIASANAT:

CAD, CAM, Koneistus, Lastuava työstö, Sorvaus, Suunnittelu

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Mechanical and Production Engineering

2018 | 37 pages

Susanna Jokioinen

INTRODUCTION OF THE 3D CAD/CAM SOFTWARE

The aim of this final thesis was to develop the machining production process in Salomaan Konepaja by introducing 3D CAD/CAM software in the CNC machining center and CNC lathe. Prior to the introduction, a thorough investigation was carried out to select the right software. The most important factor in choosing the right software was to find a compatible system between the company's machines, the 3D CAD/CAM software and the company's machining works. During the introduction, an additional postprocessor was installed on the software and tool libraries were created for both machines. Standard tools based on this information from the tool libraries were installed on the machines. Both machines were also connected to the Ethernet network during this work.

The work was carried out with an Autodesk Inventor design software with an integrated Autodesk HSM CAM add-in which were introduced at HAAS VF-4 machining center and in the HAAS ST-30Y lathe. HSM CAM add-in also includes a separate HSM Editor program designed to be used to modify NC codes, which are converted with a postprocessor.

The introduction was started by installing the Autodesk Inventor software and Autodesk HSM CAM add-in. After installation, the dimension and geometry data of the tools and tool holders were defined on the tool libraries. The machining values of the tools were defined by vendor's information. During the first test phase, test programs were executed for products which were already in production. The machining programs made with the HSM CAM software were compared to the existing programs. In this way it was ensured that the generic postprocessors were working correctly. In the second test phase, the software provided three new machining programs for the machining center and four machining programs for the lathe. All test programs also work in serial production. Both machines were connected to the Ethernet network and the process description was done for Salomaan Konepaja in the final phase of the 3D CAD/CAM software introduction.

As a result, Salomaan Konepaja has a modern 3D CAD/CAM software, whose functionality was tested in production. The introduction was successful because the machining programs produced with the software were working correctly. The programming of the machining works is faster with the CAM software. The accuracy of the machining works will improve, and it is easier to reach demanding tolerances. This allows the CAM software to provide more accurate offers and gives flexibility to meet the customer needs in a short time especially in small series production.

KEYWORDS:

CAD, CAM, Design, Machining, Milling, Turning

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO	6
1 JOHDANTO	7
1.1 Toimeksianto	7
1.2 Salomaan Konepaja Oy	8
2 3D CAD/CAM-OHJELMOINTI	9
2.1 NC-ohjelmointi	9
2.2 CAD	10
2.3 CAM	10
2.4 CAD/CAM	11
2.5 3D CAD/CAM -ohjelmiston hyödyt	12
3 CAD-MALLISTA VALMIIKSI KAPPALEEKSI	13
3.1 Suunnitteluprosessi	13
3.2 CAD-mallin luominen	14
3.3 Koordinaatistoasetusten teko	15
3.4 Vakiotyökalut ja työkalukirjastot	15
3.5 Työstöradat	16
3.6 Simulointi	16
3.7 Kääntäminen NC-ohjelmaksi	17
3.8 Postprosessori	17
3.9 Ohjelman editointi	18
4 OHJELMISTOON LIITETTÄVÄT TYÖSTÖKONEET	19
4.1 HAAS VF-4 -koneistuskeskus	19
4.2 HAAS ST-30Y -sorvi	21
5 OHJELMISTON VALINTAPERUSTEET	23
5.1 Helppokäyttöisyys	23
5.2 Integroitavat lisäosat	23
5.3 Vertaisarviointi	24
5.4 Yrityksen tarpeet ja konekanta	24

5.5 Ohjelmiston tietotekniset vaatimukset	25
5.6 Tuki- ja huoltopalvelut	25
6 KÄYTTÖÖNOTTO	26
6.1 Valintaprosessin tulos	26
6.2 Ohjelmiston asennus	26
6.3 Vakiotyökalut	27
6.4 Työkalukirjastot ja vakiotyöstöarvot	27
6.5 Postproessorin valinta	28
6.6 Työstökoneiden kytkeminen ja yhteyden muodostaminen Ethernet-verkkoon	28
6.7 HSM CAM -ohjelmiston testaus ja tuotantokäyttö	29
7 PROSESSIN KUVAUS	31
7.1 Asiakas – myynti – asiakas	31
7.2 CAD/CAM-ohjelmointi – postprosessointi – tiedonsiirto	31
7.3 Koeajo ilman kappaletta – testikappale – tuotanto	32
8 LOPUKSI	34
LÄHTEET	36
KAAVIOT	
Kaavio 1. Prosessikuvaus.	33
KUVAT	
Kuva 1. Tuotekehitysprojektin käynnistäminen (Jokinen 2010, 18).	13
Kuva 2. HAAS VF-4 -koneistuskeskus.	19
Kuva 3. HAAS VF-4 -akselit (Haas Automation 2018, 2).	20
Kuva 4. HAAS ST-30Y -CNC-sorvi.	21
Kuva 5. HAAS ST30-Y -akselit (Haas automation 2018, 242).	22
Kuva 6. Testikappaleen aihio.	29
Kuva 7. Valmis testikappale.	29

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO

CAD	Computer-aided design; tietokoneavusteinen suunnittelu.
CAM	Computer-aided manufacturing; tietokoneavusteinen valmistaminen.
CAD/CAM	Suunnitteluohjelmisto, jossa CAM-ohjelmointi tehdään samaan tietokantaan CAD-mallin kanssa.
DXF	Drawing Exchange Format; CAD-tiedostomuoto. DXF mahdollistaa tietojen siirtoa eri CAD-ohjelmistojen välillä.
Ethernet	Pakettipohjainen lähiverkkoratkaisu.
IP-osoite	IP-osoite on verkon kunkin laitteen yksilöivä tunnus. 32-bittinen IP-osoite esitetään neljällä desimaaliluvulla, jotka erotellaan pisteellä. Osoite koostuu verkkotunnuksesta (network ID) ja isäntätunnuksesta (host ID).
NC	Numerical control; numeerinen ohjaus.
Palvelin	Tietokone, joka tarjoaa siinä ajettavien palvelinohjelmistojen välityksellä erilaisia palveluja muille ohjelmille.
Postprosessori	Kääntää CAM-ohjelmistolla tehdyt työstöradat G-koodiksi. G-koodi tallennetaan nc-tiedostoformaattiin, jonka CNC-kone pystyy lukemaan.
STEP/STP	Standard for the Exchange of Product Model Data; kansainvälinen standardi, jonka avulla esitetään tuotteita käsite-mallien tasolla. Käytetään myös teollisessa tiedonsiirrossa.
Yhdyskäytävä	Lähiverkon solmu, kuten tietokone tai reititin, joka mahdollistaa liikennöinnin toiseen verkkoon.

1 JOHDANTO

1.1 Toimeksianto

Tämä insinööri työ on tehty toimeksiantona Salomaan Konepajalle. Työn tarkoituksena oli kehittää ja vakioda tuotteiden koneistamisprosessia. Yrityksellä on ennestään käytössä 2D CAM -ohjelmisto, joka on toiminnoiltaan suppea eikä enää vastaa kunnollisesti yrityksen tarpeisiin. NC-ohjelmia on ohjelmoitu osittain työstökoneelta käsin ja asetusajat ovat olleet vaihtelevia. Lisäksi haluttiin saavuttaa uusien tuotteiden nopeampi tuotannon aloittaminen ja pienempi läpimenoaika. Näiden parannuskohteiden pohjalta syntyi tarve toimeksiannolle, jossa koneistamiseen haettiin joustavuutta ja tehokkuutta 3D CAD/CAM -ohjelmiston käyttöönoton avulla.

3D CAD/CAM -ohjelmiston avulla voidaan suunnitella koneistusohjelmien työstöradat ja määrittellä työstöarvot suoraan CAD-malliin ja kääntää nämä tiedot ohjausparametreiksi työstökoneille. CAM-ohjelmoinnin teoriaa käsitellään tämän työn luvussa kaksi. Lisäksi kappaleen valmistusprosessi CAD-mallista valmiiksi kappaleeksi kuvataan luvussa kolme.

CAD/CAM-ohjelmiston käyttöönotossa on otettava huomioon yrityksessä oleva konekanta. Tässä työssä käyttöönotto rajattiin yrityksen uusimpiin työstökoneisiin. Ensimmäiseksi koneeksi valittiin pystykarainen neljäkselista työstöä suorittava HAAS VF-4 -koneistuskeskus. Toiseksi työstökoneeksi valittiin y-akselilla varustettu vaakakarainen HAAS ST-30Y -CNC-sorvi. Valitut työstökoneet on esitelty tarkemmin luvussa neljä.

Ennen varsinaista CAD/CAM-ohjelmiston hankkimista ja käyttöönottoa oli suoritettava huolellinen selvitystyö oikeanlaisen ohjelmiston valitsemiseksi. Ohjelmiston on täytettävä tietyt valintaperusteet, jotta sen hankkiminen olisi hyödyllistä ja taloudellisesti kannattavaa. Näitä valintaperusteita on esitetty tämän työn luvussa viisi.

CAM-ohjelmia testattiin molemmilla työstökoneilla tuotantokäytössä. Molemmat työstökoneet kytkettiin Ethernet-verkkoon. Lopuksi CAD/CAM-suunnittelusta tehtiin prosessikuvaus, jonka johdolla yritys toimii jatkossa uusien koneistustuotteiden suhteen. Ohjelmiston käyttöönotto ja prosessikuvaus esitellään luvussa kuusi ja seitsemän. Lopuksi esitetään jatko toimenpiteet ohjelmiston käyttöönoton kannalta. Näitä ovat esimerkiksi postprosessorin räätälöinti sekä henkilökunnan koulutukset.

1.2 Salomaan Konepaja Oy

Salomaan Konepajalla on pitkä historia metallituotteiden valmistuksessa. Yritys perustettiin Salon Kauppalaan vuonna 1930 Uno Salomaan johdosta, jolloin toiminta sisälsi sepäntöitä sekä esimerkiksi kiukaiden, nosturien ja kärryjen tekoa. Yritys kasvoi nopeasti 1950- ja 1960-luvuilla, jolloin perustettiin lisäksi oma sähkösinkityslaitos. Myöhemmin vuonna 1978 toiminta siirrettiin tilan ahtauden vuoksi Salon Halikkoon, jossa konepaja toimii edelleen Riikin teollisuusalueella. (Salomaan Konepaja 2018a.)

Salomaan Konepaja on tänä päivänä erilaisten teräskomponenttien ja teräsrakenteiden sopimusvalmistaja. Yritys tarjoaa asiakkailleen lisäksi suunnittelu- ja logistiikkapalveluja kokonaispalvelukonseptina avaimet käteen periaatteella. (Salomaan Konepaja 2018b.)

Salomaan Konepaja täyttää kansainvälisen SFS-EN ISO 9001:2015 -laatujärjestelmästandardin, SFS-EN ISO 14001:2015 -ympäristöstandardin sekä teräsrakennestandardin- EN 1090-1:2009 +A1:2011 ja hitsausstandardin- SFS-EN ISO 3834-1 mukaiset vaatimukset. Salomaan Konepaja on edelleen perheomistuksessa. (Salomaan Konepaja 2018c, 2018d.)

2 3D CAD/CAM-OHJELMOINTI

CAM-ohjelmointia (Computer-aided Manufacturing) voidaan suorittaa 2D- tai 3D-geometriatietojen perusteella. CAM-ohjelmisto voi olla erillinen ohjelmisto, tai se voi olla integroituna CAD-ohjelmistoon (Computer-aided Design). Tässä opinnäytetyössä perehdytään 3D CAD/CAM -ohjelmistoon, jolla tarkoitetaan 3D CAD -suunnitteluohjelmistoon integroitua CAM-ohjelmointi-lisäosaa. Näin ollen itse CAM-ohjelmointi tapahtuu samaan tietokantaan CAD-mallin kanssa. (Groover 2016, 709–711; Pikkarainen & Mustonen 2010, 200.)

2.1 NC-ohjelmointi

NC-ohjelma (Numerical control) koostuu konekäskyistä, jotka kuvaavat koneen eri toimintoja. NC-ohjelmoinnissa muutetaan työpiirustusten tiedot NC-työstökoneen koodikieliseen muotoon. NC-työstökone suorittaa määrättyt tehtävät näiden käskyjen perusteella. (Vesamäki 2007, 43.)

NC-ohjelman rakenne on sana – lause – osaohjelma -kokonaisuus, jossa sanoihin sisältyy osoite ja tieto-osa. Osoite on kirjain ja tieto-osa sisältää numeroita, jotka yhdessä määrittävät, millä tavalla kone toimii. Sanat puolestaan muodostavat ohjelmalauseita. Lause on ohjelman yhdelle riville järjestetty ohjelmakäskyjen ryhmä. NC-työstökone suorittaa ohjelmoidut käskyt lause kerrallaan. Osa-ohjelmat rakennetaan lauseista. Yleisesti osaohjelmat sisältävät yhden työkierron työkalun työstöradat ja -arvot sekä muut välttämättömät tiedot, kuten nollapisteen siirto ja karan pyörimisnopeuden määrittäminen. (Vesamäki 2007, 46.)

G- ja M-koodit ovat NC-ohjelman osoitetietoja, jotka määrittävät koneen toimintoja. G-koodit voivat ilmaista esimerkiksi liikekäskyn tai porauskierron tyyppin. G-koodit ovat modaalisia eli käskyt on jaoteltu ryhmittäin. Ryhmän koodin voimassaolo kumoutuu, kun saman ryhmän uusi koodi tulee voimaan. G-koodi voi olla myös ei-modaalinen, jolloin se on voimassa vain niissä lauseissa, joissa se on annettu. G-koodit ovat usein samanlaisia eri valmistajien NC-koneilla. M-koodit ovat puolestaan kytkeviä koodeja, ja ne ohjaavat NC-koneen aputoimintoja, kuten karan käynnistys tai lastuamisnesteen ohjaus. M-koodit voivat vaihdella hyvin paljon eri valmistajien NC-koneiden välillä. (Pikkarainen & Mustonen 2010, 117; Vesamäki 2007, 47.)

2.2 CAD

CAD-ohjelmistolla luodaan tietokoneavusteisesti suunniteltaville kappaleille matemaattinen kuvaus eli geometrinen malli. CAD-suunnittelu on iteratiivinen prosessi, joka koostuu neljästä vaiheesta 1) geometrinen mallinnus, 2) tekninen analyysi, 3) suunnittelun tarkastelu ja arviointi sekä 4) automatisoitu tekninen piirtäminen. (Groover 2016, 704-707.)

Geometrinen mallinnus mahdollistaa kappaleen tarkemman kuvauksen suunnitteluprosessissa. CAD-ohjelmistolla voidaan monipuolisesti muokata ja mitata valmistettavan kappaleen geometrinen malli. Teknisessä analyysissä voidaan suorittaa kappaleen massan ominaisanalyysi, kuten arvioida kappaleen tilavuus, pinta-ala, paino ja massakeskipiste. Lisäksi voidaan tehdä virheiden tarkistusta, toleranssianalyyssejä, kinemaattisia ja dynaamisia analyyssejä sekä suorittaa erilaisia simuloitteja. (Groover 2016, 704-706.)

Mallinnuksen ja teknisen analyysin jälkeen CAD-malli käy suunnittelun tarkastelun ja arvioinnin läpi. Tässä vaiheessa arvioidaan ja testataan suunniteltua tuotetta ja suoritetaan virheiden tarkistusta. CAD-malliin voidaan tehdä vielä viimehetken muutoksia. Usein valmistetaan myös kappaleen fyysinen tai virtuaalinen prototyyppi. Lopulta kappaleen malli hyväksytään ja siitä tehdään tekninen dokumentaatio CAD-ohjelmiston automatisoidulla piirustustyökalulla. (Groover 2016, 706-707.)

2.3 CAM

CAM tarkoittaa tuotteen tietokoneavusteista valmistamista erikoisohjelmiston avulla. CAM-sovellukset voidaan jakaa kahden pääryhmän alle 1) Valmistuksen suunnittelu (Manufacturing planning) ja 2) Valmistuksen ohjaus (Manufacturing control). Tavallisesti tällaisia sovelluksia ovat konepajassa CAM-ohjelmointi ja levyajoissa nestaus eli tuotteen automaattinen sijoittelu ja leikkauksen ohjelmointi. (Groover 2016, 710; Pikkarainen & Mustonen 2010, 200.)

Tässä opinnäytetyössä käsitellään tietokoneavusteista NC-ohjelmointia eli CAM-ohjelmointia, joka kuuluu pääryhmään 1) Valmistuksen suunnittelu. Tietokoneavusteista valmistuksen suunnittelua ovat lisäksi prosessisuunnittelu, työstöarvojen luokittelu, tuotteen kustannusarviointi ja tuotannon suunnittelu. (Groover 2016, 710-711.)

CAM-ohjelmoinnissa luodaan NC-koneiden työstöratoja ja ohjataan työkalun liikkeitä kappaleen geometriaan tukeutuen. Usein työstörata käsittää vain yhden työkalun liikkeen. Työstöratoja voidaan muokata ja korjata. Ohjelman simulointi on tärkeä CAM-ohjelmoinnin ominaisuus. Simuloinnin avulla voidaan arvioida kappaleen työstöaika ja suorittaa törmäystarkastelu. Simuloinnin tuloksen perusteella voidaan vielä korjata työstörataa ja työstöarvoja. Periaate on, että simulointia ja korjaamista jatketaan siihen saakka, kunnes työstörata on täysin valmis. Vasta tämän jälkeen voidaan suunnitella toinen työstörata. Valmiit työstöradat järjestetään vielä työkalujen mukaiseen järjestykseen, jotta löydetään paras ratkaisu oikeanlaiseen ja kannattavaan koneistamiseen. (Pikkarainen & Mustonen 2010, 200-202.)

Lopuksi CAM-ohjelmalle suoritetaan postproessori-ajo. Tämä tarkoittaa, että postproessori kääntää kappaleen geometriatietoihin perustuvat työstöradat valmiiksi G-koodiksi eli NC-ohjelmaksi, jota työstökoneen ohjaus pystyy lukemaan. (Pikkarainen & Mustonen 2010, 202.) Postprosessoinnilla on merkittävä osa CAM-ohjelmoinnissa. Aihetta käsitellään tarkemmin tämän työn luvussa 3. Ohjelmiston valinta.

2.4 CAD/CAM

CAD/CAM-ohjelmoinnin tarkoituksena on luoda ja suunnitella koneistusohjelmien työstöradat ja määrittellä työstöarvot suoraan CAD-malliin, sekä kääntää nämä tiedot ohjausparametreiksi työstökoneille. Yleisesti CAD/CAM-ohjelmistossa CAM-ohjelmointi on lisäosa, joka on integroitu CAD-suunnitteluohjelmistoon. Näin ollen itse CAM-ohjelmointi tapahtuu samaan tietokantaan CAD-mallin kanssa. Luodun CAM-ohjelman voi simuloida työstöajan ja törmäystarkastelun arvioimiseksi. Ihanteellisessa tilanteessa CAD/CAM-ohjelmistolla voidaan automatisoida tuotteen suunnitteluprosessi ja valmistussuunnitelma yhdeksi kokonaisuudeksi samalla ohjelmistolla. Tällaisella järjestelyllä tuotekehitys, NC-ohjelmointi ja tuotteen fyysinen valmistaminen laitetaan täytäntöön tietokoneen avulla. (Groover 2016, 711.)

2.5 3D CAD/CAM -ohjelmiston hyödyt

3D CAD/CAM -ohjelmisto tuo mukanaan hyötyjä. Vaikeiden muotojen, kuten kolmiulotteisten pintojen ohjelmointi helpottuu ja nopeutuu ohjelmiston myötä. 3D CAD -mallinnuksella saadaan valmis geometria, jonka pohjalta on nopeaa ja helppoa laatia työstöradat. Manuaalisen ohjelmoinnin ja -laskennan määrä vähenee, jonka myötä inhimillisten virheiden määrä vähenee sekä työstökoneiden lastuavaa työstöaikaa saadaan lisää. (Pikkarainen & Mustonen 2010, 203.)

Lisäksi tehdyt NC-ohjelmat ovat parempia, koska ne ovat simuloitu ohjelmistolla. Simuloinnin avulla suoritettu törmäystarkastelu mahdollistaa, että tehdyn ohjelman virheettömyydestä voidaan olla melko varmoja. Törmäystarkastelun vuoksi ohjelmaa ei tarvitse tarkistaa itse työstökoneella niin perusteellisesti. (Pikkarainen & Mustonen 2010, 203.)

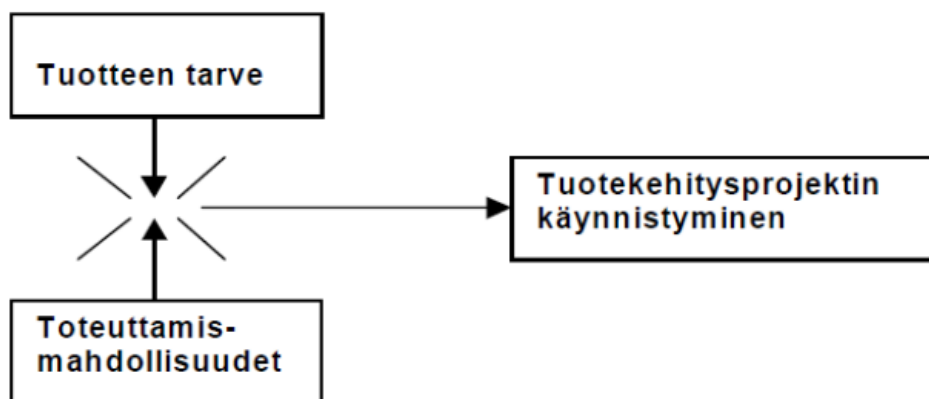
Ohjelman simuloinnilla on muitakin hyötyjä, voidaan esimerkiksi testata uusia malleja tai revisioita ilman resursseja niiden toteuttamiseen. Ohjelmistolla voidaan suorittaa aikalaskentaa ja tehdä tarvittavia muutoksia suoritusajan parantamiseksi. Lisäksi toimintatavat ja muu päätöksenteko voidaan tehdä häiritsemättä meneillään olevaa tuotantoa. (Shannon 1998, 7-8.) Työstöajan laskennan vuoksi ja simuloinnin avulla CAD/CAM-järjestelmä auttaa laatimaan tarkempia tarjouksia, koska tarjouksen tekijä pystyy tuottamaan dataa etukäteen ja arvioimaan esimerkiksi tuotteen valmistuskustannuksia. Simulointia voidaan käyttää myös henkilöstöntarpeen selvittämiseen, olisiko esimerkiksi mahdollista suorittaa ohjelmaa työstökoneella miehittämättömänä.

3 CAD-MALLISTA VALMIIKSI KAPPALEEKSI

Tässä luvussa käydään läpi kappaleen valmistusprosessi suunnittelusta alkaen ohjelman editointi- ja testausvaiheeseen asti. Suunnittelutoimistot tekevät usein valmistettavasta kappaleesta 3D-mallin, jolloin kappaleen geometriatiedot saadaan valmiina esimerkiksi STEP-tiedostona. Tällöin kappaleeseen tarvitsee tehdä vain CAM-ohjelmointi CAD/CAM-ohjelmistolla. Jos valmistettavasta kappaleesta ei ole aiempaa 3D-mallia, on kappale suunniteltava ja mallinnettava CAD-ohjelmistolla ennen varsinaista CAM-ohjelmointia sekä valmistusta työstökoneella.

3.1 Suunnitteluprosessi

Tuotteen elinkaari alkaa, kun jollekin valmistettavalle kappaleelle syntyy tarve. Kuvassa 1 on esitetty, miten tuotteen tarve ja toteuttamismahdollisuudet käynnistävät tuotekehitysprojektin. (Jokinen 2010, 18.)



Kuva 1. Tuotekehitysprojektin käynnistäminen (Jokinen 2010, 18).

Suunnitteluprosessi etenee iteratiivisesti vaihe kerrallaan. Suunnittelija määrittelee suunnittelukohteen keskeisen ongelman, hahmottaa mahdollisia ratkaisuja ja tähtää näiden tekemisen näkyviksi ja yksityiskohtaisiksi. Suunnitteluratkaisut kehittyvät asteittain arviomalla ongelmaa uudelleen, osittamalla ja kokoamalla ongelmaa, määrittämällä suunnittelun rajoitteita sekä ideoimalla ja testaamalla uusia suunnitteluideoita. (Seitamaa-Hakkarainen.)

3.2 CAD-mallin luominen

Valmistettavan kappaleen CAD-mallin luominen etenee vaiheittain 1) geometrinen mallinnus, 2) tekninen analyysi, 3) suunnittelun tarkastelu ja arviointi sekä 4) automatisoitu tekninen piirtäminen. (Groover 2016, 704-707.)

3D-mallinnusvaiheessa suunnittelija valitsee kappaleelle tarkastelusuunnan ja tekee kappaleesta sketsin. Seuraavaksi sketsi muutetaan 3D-malliksi esimerkiksi käyttämällä pursotustyökalua. 3D-mallia muokataan lisäämällä tai poistamalla materiaalia erilaisilla käskyillä. Malli on valmis, kun se täyttää sille asetetut geometriset vaatimukset. Suunnittelijan on kiinnitettävä huomiota siihen, minkä suhteen piirteet ja mitat määritellään sekä ajateltava kappaleen muokkausmahdollisuuksia jälkeenpäin (Tuhola & Viitanen 2008, 33–34).

Valmistettava kappale voidaan myös 3D-mallintaa jo olemassa olevan teknisen piirustuksen mittatietojen pohjalta. Kappaleesta voi olla myös tehty aiemmin esimerkiksi DXF-tiedostomuoto, josta voi mitata kappaleen geometriat 3D-mallia varten. Näin ollen aina ei tarvitse suorittaa CAD-prosessin muita vaiheita, kuten teknistä analyysia tai automatisoitua piirtämistä, koska ne ovat tehty jo aiemmin kappaleen elinkaaren aikana.

Kappaleen geometriatiedot voidaan tuoda CAD/CAM-ohjelmistoon myös laserskannattuna 3D-mallina. Tapaa voidaan hyödyntää, jos halutaan esimerkiksi valmistaa olemassa oleva kappale, josta ei ole saatavilla aiempaa teknistä dokumentaatiota. Valmistettava kappale laserskannataan. Tämän jälkeen skannatun 3D-mallin data tuodaan pistepilvenä erilliseen pistepilven muokkausohjelmistoon. Muokatun pistepilven avulla muodostetaan kappaleesta 3D-malli CAD-ohjelmistolle. (IEEE GlobalSpec 2018; Neopoint 2018.) Kappale voidaan 3D-skannata myös esimerkiksi strukturoidulla valolla. Tällä menetelmällä skannerit analysoivat skannattavan kohteen pinnanmuotoja projisoimalla mustavalkoisen viivakuvion skannauskohteeseen. Sama kuvio heijastuu pinnasta takaisin skannerin kameroihin. Kamera lähettää nämä kuvat skannausohjelmistoon, joka analysoi heijastuneen kuvion eroja lähetettyyn kuvioon ja muodostaa kappaleen mallin. (Polyga 2018.)

3.3 Koordinaatistoasetusten teko

CAD-mallin luomisen jälkeen siirrytään itse CAM-ohjelmointiin. CAM-ohjelmointi aloitetaan tekemällä koordinaatistoasetukset valmistettavalle kappaleelle. On tärkeää miettiä esimerkiksi työstöratojen kulkusuuntia ja kappaleen kiinnityskohtia asetusta tehdessä, koska kappaleeseen valittu koordinaatisto vastaa työstökoneen koordinaatteja. Kappaleelle valitaan CAD-mallista nollapiste sekä x-, y- ja z-akseleiden positiiviset suunnat. (Autodesk HSM 2018a.) Virheellinen koordinaatiston asetus voi johtaa törmäyksiin ja vakaviin vahinkoihin, jos CAM-ohjelman koordinaatisto ja työstökoneen koordinaatisto eivät vastaa toisiaan.

3.4 Vakiotyökalut ja työkalukirjastot

NC-koneen työkalujärjestelmässä on useita erilaisia pitimiä, jotka sopivat erilaisien työkalujen kiinnittämiseen. Kaikki työkalut eivät mahdu työkalujärjestelmään kerrallaan, vaan työkaluja täytyy purkaa ja vaihtaa tarpeen mukaan. Osa työkaluista on kuitenkin hyvä luokitella vakiotyökaluiksi, jotka pidetään koko ajan koottuina makasiinissa. Yrityksen loput työstökoneiden työkalut olisi hyvä luokitella suositeltuihin työkaluihin ja tilapäisiin työkaluihin. Suositeltujen työkalujen purkamista pyritään välttämään, kun taas tilapäiset työkalut ovat purettavissa tapauskohtaisesti. Yrityksen koneistusohjelmien suunnittelussa suositetaan työkiertoja, jotka voidaan suorittaa vakiotyökaluilla. (Pikkarainen & Mustonen 2010, 73.)

Valittujen työkalujen ja pitimien mitta- sekä geometriatiedot siirretään CAD/CAM-ohjelmiston työkalukirjastoihin. Lisäksi työkalukirjastoihin lisätään terien ja teräpalojen työstöarvot. Samalla voidaan määrittää esimerkiksi työkalun yhteydessä käytettävä jäähdytystapa. (Autodesk HSM 2018a.) Näitä teknisiä tietoja voidaan myös muuttaa ohjelmoinnin edetessä (Pikkarainen & Mustonen 2010, 201).

Työssä käytettävät työkalut on hyvä miettiä etukäteen ennen työstökiertojen ja -ratojen tekoa. On pohdittava minkälaisilla pitimillä, terillä ja teräpaloilla saavutetaan optimaalisin lopputulos. Valmistettavan kappaleen materiaali vaikuttaa myös siihen, millaiset työkalut valitaan.

3.5 Työstöradat

Seuraavassa vaiheessa kappaleeseen suunnitellaan koneistamista varten työstöratoja. Usein työstörata käsittää kerrallaan vain yhden työkalun liikkeitä. Työstörataan valitaan oikea työkalu CAM-ohjelmiston työkalukirjastosta. Työkalun tekniset tiedot voidaan myös määrittää vain työstöratakohtaisesti. (Pikkarainen & Mustonen 2010, 202.)

Tehty työstörata simuloidaan ja korjataan, jos havaitaan puutteita. Simuloinnilla varmistetaan oikeanlainen työstörata ja poissuljetaan mahdolliset törmäykset. Tätä prosessia jatketaan, kunnes kaikki kappaleen vaatimat työstöradat saadaan valmiiksi. Tällä tavalla ohjelmoimalla voidaan vaikeissakin kappaleissa keskittyä pieniin osa-alueisiin ja tarkistaa jokainen vaihe erikseen. Lopuksi kaikki työstöradat järjestellään siten, missä järjestyksessä kukin työkalu koneistaa kappaletta. Tällä tavoin ohjelmaan saadaan oikea työkalujärjestys. (Pikkarainen & Mustonen 2010, 202.) Lisäksi pitää suunnitella kappaleen kiinnittäminen työstöpöytään. On mietittävä, onnistuuko kappaleen kiinnittäminen työstöpöytään vakiokiinnittimillä vai tuleeko kiinnittämistä varten suunnitella esimerkiksi tuotekohtainen jigi.

3.6 Simulointi

3D CAD/CAM -ohjelmistoilla voidaan simuloida yksittäinen työstörata tai koko ohjelma alusta loppuun. Tarkoituksena on verrata työkalun liikkeitä kappaleen geometriaan nähdessä. Voidaan tarkistaa, onko työkalu soveltuva työstörataan ja onko sen liike tarkoituksenmukaista. Lisäksi voidaan katsoa esimerkiksi jyräisyvyyttä sekä ohjelman yleistä selkeyttä ja virheettömyyttä. Työstörataa voidaan vielä korjata tehdyn simuloinnin perusteella. (Pikkarainen & Mustonen 2010, 201-202.)

3D CAD/CAM -ohjelmistoissa on mahdollisuus mallintaa myös kiinnittimet ja työstöpöytä CAM-ohjelman simulointia ja törmäystarkastelua varten. Työstökoneiden valmistajilta voidaan hankkia koko työstökoneen 3D-malli, jolloin voidaan esimerkiksi tarkistaa millä tavoin isojen kappaleiden kiinnittäminen ja työstö on mahdollista tehdä. Tällä tavoin voidaan varmistua, ettei työstökone törmää tai ylitä akselien ääriarvoja NC-ohjelman suorittamisen aikana. (Salomaa 2018.)

Huolellisesti suoritettu simulointi mahdollistaa, että tehdyn ohjelman virheettömyydestä voidaan olla melko varmoja. Simuloinnin vuoksi ohjelmaa ei tarvitse tarkistaa itse työstökoneella niin perusteellisesti. CAD/CAM-ohjelmistolla voidaan suorittaa lisäksi aikalaskentaa ja tehdä tarvittavia muutoksia suoritusajan parantamiseksi. (Pikkarainen & Mustonen 2010, 203.)

3.7 Kääntäminen NC-ohjelmaksi

Kun kaikki työstökierrot ja -radat on tehty valmiiksi ja koko ohjelma on simuloitu huolellisesti läpi, käännetään ohjelma postprosessorilla työstökoneen ymmärtämään muotoon NC-koodiksi. Postprosessori laskee kappaleen geometriatiedoista NC-ohjelman koordinaatit ja määrittää muut tiedot, esimerkiksi kytkentäkäskyt ja kommentit. (Pikkarainen & Mustonen 2010, 202.)

Postprosessoinnilla on tärkeä merkitys, sillä sen tulee muuntaa CAM:in tekemä rata koodiksi, jota työstökoneen ohjaus ymmärtää (Valuatlas 2009, 3). Seuraavassa luvussa 3.8 on käsitelty postprosessointia tarkemmin.

3.8 Postprosessori

NC-ohjelma ei ole koskaan yleiskäyttöinen, koska jokaisella työstökoneryhmällä on omat ohjausparametrit ja ne voivat vaihdella konevalmistajan mukaan. CAD-malliin rakennettu CAM-ohjelma työstöratoineen ei sinällään ole vielä valmis koneistusohjelma. CAM-ohjelma tulee vielä lopuksi kääntää postprosessorilla NC-ohjelmaksi eli G-koodiksi, jota CNC-kone pystyy lukemaan. (Valuatlas 2009, 3.)

Vääränlaisella postprosessorilla tehty CAM-ohjelma voi kääntyä NC-ohjelmaan virheelliseksi ohjausparametreiksi ja työstökoneessa voi sattua törmäyksiä. (Valuatlas 2009, 3.) Tämän syyn vuoksi yrityksessä oleva konekanta määrittää minkälainen postprosessori on oikeanlainen.

Yleisesti CAM-ohjelmiston mukana toimitetaan useita geneerisiä postprosessoreita yleisimpien konemerkkien mukaan. Geneerisiä postprosessoreita joudutaan kuitenkin usein muokkaamaan, sillä koneissa voi olla lisäoptioita ja muita ominaisuuksia, jonka vuoksi koodin pitää olla erilaista. Tämä tarkoittaa, että kaksi identtistä konemallia voi vaatia eri

koodia riippuen siitä, mitkä koneen asetukset ovat ja miten sitä halutaan käyttää. (Mastercam 2018; In-House Solutions 2018.)

Muokkauksella saadaan aikaan sellaisia postprosessoreita, joiden avulla käännettyä G-koodia ei tarvitse enää jälkeen päin muokata. Koneen omistajan tulee myös osallistua muokausprosessiin, sillä muokatulla postproessorilla käännettyä NC-koodia pitää testata ja siitä pitää antaa palautetta postproessorin valmistajalle. Postproessorin valmistajan olisi hyvä saada tietoonsa ennen muokausprosessia ainakin seuraavat koneen tiedot (Mastercam 2018a; In-House Solutions 2018.):

- koneen merkki ja malli
- ohjauksen merkki ja malli
- asiakkaan sovellus
- käytettävissä olevat koneoptiot
- laitteen käyttöönoton yhteydessä tehdyt asetukset
- koneen kinemaattinen / fyysinen konfiguraatio
- liikeakselien suunnat ja rajat
- esimerkkikoodi
- G & M-koodiluettelo.

3.9 Ohjelman editointi

Luodun NC-ohjelman ohjelmakoodia voi joutua muokkaamaan postproessorilla kääntämisen jälkeen. Kappaleen työstövaiheessa voidaan huomata, ettei jokin osa ohjelmasta toimi täysin odotetulla tavalla tai jotain osaa ohjelmasta päätetäänkin muuttaa muiden syiden vuoksi. Tällöin on helppoa ja nopeaa lisätä tai poistaa sekä tarkistaa tehty ohjelmakoodi editorilla (Autodesk HSM 2018b). Ohjelman editoinnin voi suorittaa esimerkiksi siihen tarkoitetulla lisäohjelmistolla (Autodesk HSM 2018b). Yksinkertaisimmillaan ohjelman editointi tapahtuu tietokoneeseen ladattavalla tekstinkäsittelyohjelmalla (HSM Advisor 2009-2018).

4 OHJELMISTOON LIITETTÄVÄT TYÖSTÖKONEET

CAD/CAM-ohjelmistoon päätettiin liittää Salomaan Konepajan kaksi uusinta työstökoneetta. Uusilla työstökoneilla tehdään sarjatuotannossa tarkkuutta vaativia töitä, jonka lisäksi niillä voidaan saavuttaa nopeampia tahtiaikoja koneiden nopean ohjauksen avulla. Alla on esitelty ohjelmistoon liitetyt HAAS:n työstökoneet ominaisuuksineen.

4.1 HAAS VF-4 -koneistuskeskus

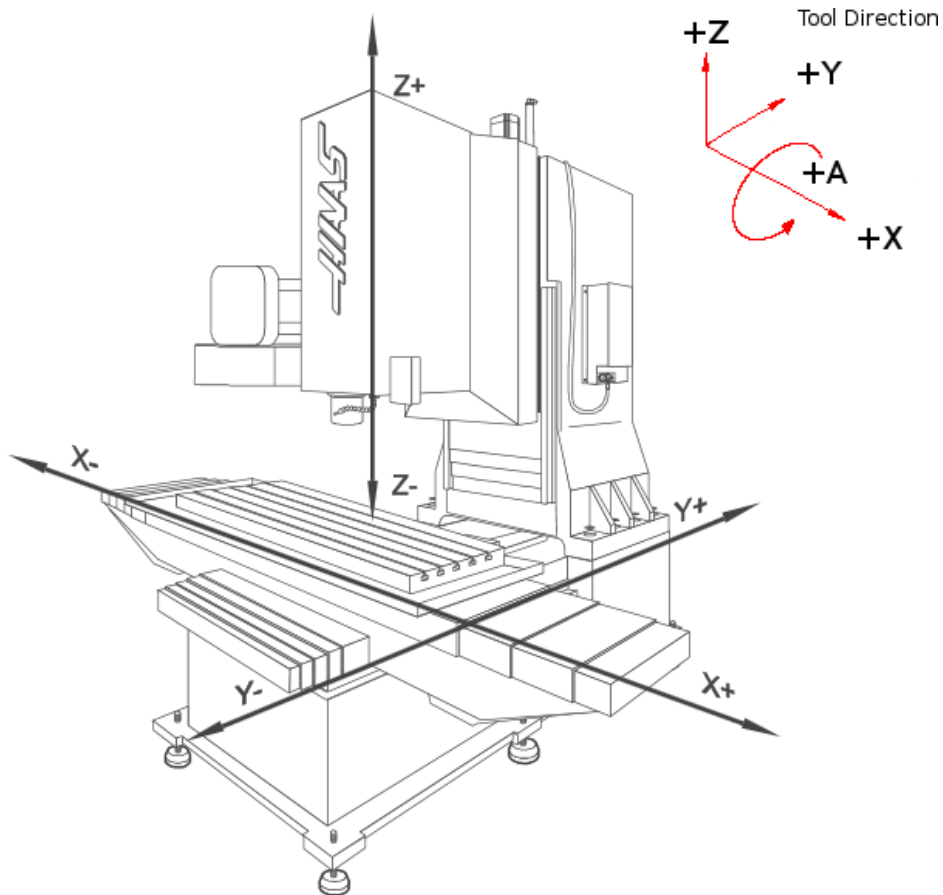
Pystykaraisessa neljäkselista työstöä suorittavassa HAAS VF-4 -koneistuskeskussa (kuva 2) on seuraavia ominaisuuksia (Haas Automation 2018a.):

- X-, Y- ja Z-akselien liikeradan pituudet 1270 x 508 x 635 mm
- karan teho 30 hv (22,4 kW)
- karan maksimipyörimisnopeus 8100 r/min
- karan maksimivääntömomentti 122 Nm @ 2000 rpm
- maksimisyöttönopeus pikaliikkeessä 25,4 m/min
- Renishaw Probe -mittalaite
- 24-paikkainen karusellityökalunvaihtaja
- 208 litran jäähdytysjärjestelmä.



Kuva 2. HAAS VF-4 -koneistuskeskus.

VF-4-mallissa on vakiona X-, Y- ja Z-akselin suuntaiset liikeradat. Lisäksi koneistuskeskukseen voidaan lisätä neljännen akselin vapausaste asentamalla lisävarusteena pyöröpöytä kiinnityspöytään. Neljättä akselia nimetään A-kirjaimella, ja se pyörii X-akselin ympäri. Neljännen akselin pyörimissuunta on esitetty kuvassa 3. (Haas Automation 2018, 2.)



Kuva 3. HAAS VF-4 -akselit (Haas Automation 2018, 2).

4.2 HAAS ST-30Y -sorvi

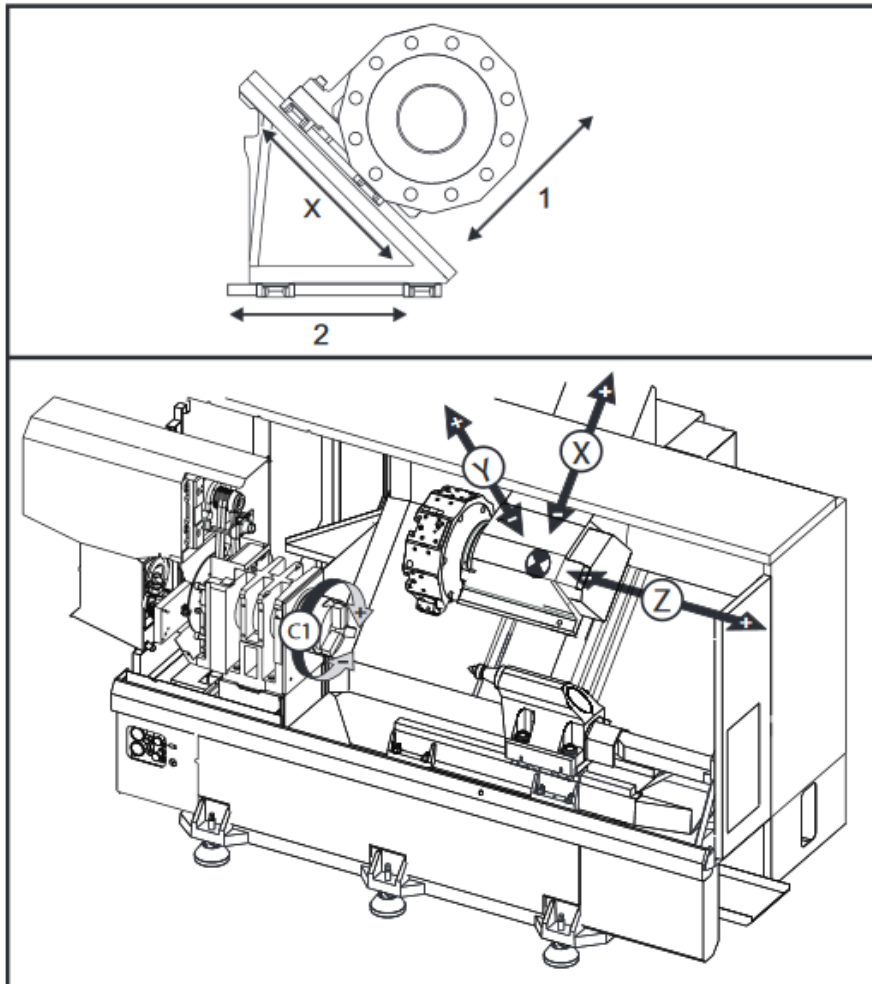
Y-akselilla varustetussa vaakakaraisessa HAAS ST-30Y -CNC-sorvissa (kuva 4) on seuraavia ominaisuuksia (Haas Automation 2018b.):

- X- ja Z-akselien liikeradan pituudet 457 x 584 mm
- Y-akselin liikeradan pituus $\pm 50,8$ mm
- karan maksimi teho 30 hv (22,4 kW)
- karan maksimipyörimisnopeus 3400 r/min
- karan maksimivääntömomntti 407 Nm @ 500 rpm
- 254 mm istukka
- 12-paikkainen työkalumakasiini
- pyörivät työkalut X- ja Z-akselien suuntaisesti.



Kuva 4. HAAS ST-30Y -CNC-sorvi.

Kuvassa 5 on esitetty ST30-Y -sorvin akselit. Kuvan ylälaatikon sisällä on numeroituna suunnat: 1) Y-akselin liike ja 2) koneen horisontaalinen taso. Kuvan alalaatikon sisällä on kuvattu sorvin akselien koordinaatisto. Kuvasta käy ilmi, että X-taso on kulmatasossa todelliseen horisontaaliseen tasoon nähden. (Haas automation 2018, 242.)



Kuva 5. HAAS ST30-Y -akselit (Haas automation 2018, 242).

5 OHJELMISTON VALINTAPERUSTEET

Ohjelmiston on täytettävä tietyt ominaisuudet, jotta se vastaisi mahdollisimman hyvin yrityksen tarpeisiin. Huolellisella valintaprosessilla vältetään myös CAM-ohjelmiston kompastuskiviä, joita voivat olla esimerkiksi sopimaton postprosessori tai ominaisuuksiltaan vaikeasti hallittava ohjelmisto. (Mercer 2000, 3-4.) Valintaprosessin tarkoituksena on löytää helppokäyttöinen ja toimiva kokonaisuus CAD/CAM-ohjelmiston, yrityksen käytössä olevan konekannan sekä yrityksen koneistustöiden välillä. CAM-ohjelmiston valintaperusteita esitetään alaotsikoin tässä luvussa.

5.1 Helppokäyttöisyys

CAM-ohjelmiston on oltava helppokäyttöinen loppukäyttäjän näkökulmasta. Vaikeasti hallittava CAM-ohjelmisto rajoittaa loppukäyttäjää saavuttamasta optimaalista työtehokkuuttaan. Samalla kappaleen valmistusprosessi hidastuu ja työtyytyväisyys vähenee. (Mercer 2000, 15-16.)

CAM-ohjelmiston käyttöliittymän on oltava yksinkertainen, sisältäen mahdollisimman vähän piilotettuja toimintoja. Lisäksi toiminnot on ryhmitelty selkeästi esimerkiksi työstötavan mukaan ja niihin on liitetty työstötappaa kuvaava symboli. (Mercer 2000, 15-16.)

Helppokäyttöisyyttä pyritään lisäämään ohjelmiston valmistajan tarjoamilla aputoiminnoilla, kuten keskustelufoorumit, tutoriaalit ja online-apu. Aputoimintojen myötä loppukäyttäjä pystyy nopeasti ja vaivattomasti hakemaan lisää tietoa ja ratkaisemaan ongelman. Tämä puolestaan lisää loppukäyttäjän työtehokkuutta ja kykyä ratkaista tulevia ongelmatilanteita. (Mercer 2000, 15-16.)

5.2 Integroitavat lisäosat

Hyvän CAD/CAM-ohjelmiston tunnusmerkkinä on mahdollisuus investoida lisäosiin ja ohjelmistopäivityksiin jälkeenpäin. Erilaisilla lisäosilla voidaan suorittaa esimerkiksi kappaleen nestaus, ohutlevytuotteiden taivutusohjelmien tekoa ja kappaleen valmistuksen

optimointia ja simulointia. Suunnittelija pystyy optimoinnin ja simuloinnin avulla analysoimaan etukäteen mahdollisia valmistukseen liittyviä riskejä ja virheitä. (Mercer 2000, 16-19.)

Lisäosilla voidaan räätälöidä ohjelmistoa vastaamaan paremmin yrityksen tarpeita silloin, kun yritys esimerkiksi muuttaa toimintatapojaan ohjelmiston hankinnan jälkeen. Lisäosien avulla voidaan jakaa investointeja pidemmälle aikavälille. Näin ollen ohjelmiston kertakustannus hankintahetkellä ei koidu liian suureksi. Tämä menettely sopii erityisesti pienille ja keskisuurille yrityksille. (Mercer 2000, 16-19.)

5.3 Vertaisarviointi

Ohjelmiston valintavaiheessa on hyvä suorittaa eri ohjelmistojen välinen vertaisarviointi. Vertaisarvioinnin avulla voidaan selvittää referenssipiste, joka mittaa eri ohjelmistojen suorituskykyä yrityksen tarpeisiin nähden. Jotta vertaisarvioinnista tulisi validi, on CAD/CAM-ohjelmistoilla teetettävä vaikein mahdollinen kappale. Tällä tavoin ohjelmiston kaikki ominaisuudet tulevat esille. Samalla todennäköisyys epäsovivan järjestelmän hankintaan pienenee. (Mercer 2000, 21-22.)

5.4 Yrityksen tarpeet ja konekanta

Valintavaiheessa on myös valittava, mitkä yrityksen työstökoneet tullaan liittämään ohjelmistoon. Yrityksellä voi olla käytössään monen eri valmistajan työstökoneita, joissa voi puolestaan olla eri valmistajien ohjauksia tai lisäoptioita. Koneissa oleva ohjaus vaikuttaa siihen, millainen postproessori ohjelmistossa tulee olla. (Mastercam 2018; Valuatlas 2009, 3.)

Jotkin yrityksen työstökoneet voivat olla tarkoitettu jatkuvaan sarjatuotantoon vain yhdelle tuotteelle, kun taas jokin työstökone voi olla käytössä usean tuotteen piensarjatuotannossa ja esimerkiksi yksittäisten protomallien valmistuksessa. On mietittävä mitkä yrityksen työstökoneista on järkevintä liittää ohjelmistoon ja minkälaisilla kombinaatioilla saavutetaan suurin hyöty CAM-ohjelmiston ja yrityksen koneistustöiden välillä.

5.5 Ohjelmiston tietotekniset vaatimukset

Lisäksi tulee selvittää, minkälaisia tietoteknisiä vaatimuksia CAM-ohjelmistolla on. Ohjelmistojen valmistajilta saa tarkat tiedot vaadituista ominaisuuksista. Laitevaatimuksissa otetaan huomioon ainakin PC:n järjestelmä, prosessori, muisti, näyttö ja näytönohjain sekä käyttömuisti. (Mastercam 2018b; Autodesk Inc. 2018a.)

On huomioitava, että laajat 3D CAD/CAM -suunnitteluohjelmistot voivat sisältää lisäksi useita integroitavia lisäosia, jotka voivat vaatia tietynlaisia sovelluksia toimiakseen, kuten Microsoft Office 365 tai vastaava. Yleisesti ottaen liikkuvat grafiikat ja virtualisointi tarvitsevat lisäkapasiteettia. (Autodesk 2018a.)

Näiden tietojen pohjalta voidaan tarkistaa, sopiiko esimerkiksi jo yrityksen käytössä oleva tietokone ominaisuuksiltaan paljon tehoa vaativaan suorittamiseen. Lisäkustannuksia ohjelmiston hankintahinnan lisäksi voi syntyä siis esimerkiksi uuden tietokoneen hankinnan tai päivityksien myötä.

Usein CAD/CAM-ohjelmistolla tehdyt koneistusohjelmat siirretään suoraan tietokoneelta työstökeskukselle. Ohjelmiston sekä työstökoneen on kyettävä kommunikoimaan keskenään. Näin ollen tiedonsiirtoon vaadittavat tekijät tulee myös selvittää. Tullaanko tiedonsiirto suorittamaan kiinteitä Ethernet-kaapeleita pitkin vai langattoman verkon kautta.

5.6 Tuki- ja huoltopalvelut

Ohjelmistotuella ja huoltopalveluilla on merkittävä rooli CAD/CAM-ohjelmiston valinnassa. Tekniikan muuttuessa nopeasti, on käyttäjien pystyttävä luottamaan myyjien ja ohjelmistovalmistajien antamaan tukeen. Arvioimalla palveluntarjoajaa, käyttäjä saa käsityksen siitä, miten ohjelmisto toimii ja mitä tuki- ja huoltopalveluita on tarjolla. Useimmat ohjelmistot käyttävät ”HELP”-kirjastoja ja hakemistoja, joista voi syntyä ongelmia silloin, jos kyseiset palvelut ovat tarjolla vain esimerkiksi internetin välityksellä.

Ammattilaisista koostuvat käyttäjäryhmät usein myös keskustelevat kokemuksista tiettyihin CAD/CAM-aiheisiin liittyen keskustelufoorumeilla. He etsivät myös apua toimittajilta, myyjiltä ja muilta työntekijöiltä vastaamaan kiireellisiin kysymyksiin. (Mercer 2000, 24-25.)

6 KÄYTTÖÖNOTTO

6.1 Valintaprosessin tulos

Salomaan Konepajassa on ennestään käytössä 3D-suunnitteluohjelmisto Autodesk Inventor. Autodesk Inventor-ohjelmistoon on saatavilla runsaasti erilaisia lisäosia, kuten CAM-ohjelmointiin tarkoitettu Autodesk Inventor HSM CAM. Lisäksi HSM CAM-ohjelmistossa on useita erilaisia geneerisiä postprosessoreita, mukaan lukien HAAS-koneistuskeskuksille ja -sorveille tarkoitettut geneeriset postproessorit. Salomaan Konepajassa on puolestaan käytössä HAAS koneistuskeskus ja -sorvi.

Ajateltiin, että selkein tie CAM-ohjelmiston hankintaan on täydentää jo olemassa olevaa suunnitteluohjelmistoa lisäosalla, joka sisältää geneeriset postproessorit yrityksen käytössä oleville työstökoneille. Asennus ja käyttöönotto ovat myös selkeämmät tehdä, kun yrityksellä on ennestään pohjakokemusta Inventor-suunnitteluohjelmiston käytöstä.

Autodeskillä on laaja tuki- ja keskustelufoorumi ohjelmistoihin liittyvissä kysymyksissä ja ominaisuuksissa. Lisäksi Inventor HSM:llä on oma asiantuntijasivusto ja keskustelupalsta HSM CAM-ohjelmointia varten. Lopulliseen ohjelmiston valintaan vaikutti siis merkittävimmin yrityksen olemassa oleva konekanta ja käytössä oleva 3D suunnitteluohjelmisto ominaisuuksineen.

6.2 Ohjelmiston asennus

Salomaan Konepajaan hankittiin tehokannettava Autodesk Inventor -suunnitteluohjelmistoa ja HSM CAM -lisäosaa varten. Inventor-ohjelmisto hankittiin kolmen vuoden lisenssillä ja HSM CAM-lisäosa yhden vuoden lisenssillä. Vuoden mittaisella lisenssillä pyrittiin pienentämään riskiä epäsopivan CAM-ohjelmiston hankintaan. Asennus aloitettiin Inventor-ohjelmiston asennuksella ja tämän jälkeen asennettiin HSM CAM-lisäosa. Asennuksessa ei ilmennyt ongelmia.

6.3 Vakiotyökalut

Salomaan Konepajassa päädyttiin valitsemaan CAD/CAM-ohjelmiston myötä vakiotyökalut ohjelmistoon liitettäville koneistuskeskukselle ja sorville. Vakiotyökalut ja -pitimet valittiin haastattelemalla yrityksen tuotannon esimiehiä ja koneistajia, joilla on vahvin kokemus ja tieto, millaiset työkalut ovat eniten käytössä yrityksen koneistustöissä.

Ensin päätettiin HAAS VF-4 -koneistuskeskuksen vakiotyökalut. VF-4 -koneessa on karuselli työkalumakasiini, johon mahtuu 24 työkalua sekä karassa kiinni oleva työkalu. Työkalupaikat 1–5 haluttiin jättää tyhjäksi vaihtuvia työkaluja varten. Loput työkalupaikat 6–23 täytettiin valituilla vakiotyökaluilla. Viimeinen työkalupaikka 24 on vakioituna Renishawn Probe-mittalaitteelle, joka on asetettu ja kalibroitu juuri kyseisen HAAS koneistuskeskuksen parametrien mukaan. Probe-mittalaitteen avulla voidaan suorittaa automaattista työkalun ja työstettävän kappaleen mittausta (Renishaw 2001-2018).

HAAS 30-Y -sorvissa on 12-paikkainen karusellimallinen työkalumakasiini. Ensimmäiset 1–5 työkalupaikkaa varattiin vaihtuville työkaluille ja paikat 6–11 vakiotyökaluille. Työkalupaikka 12 on ennestään vakioitu Grippex-tangonvetolaitteelle.

Valittujen vakiotyökalujen ja vakiopitimien mitta- ja geometriatiedot kerättiin excel-taulukoihin ja niistä tehtiin työohjeet Salomaan Konepajalle. Työkaluista ja pitimistä kerättiin taulukoihin myös myyjien tilauskoodit.

6.4 Työkalukirjastot ja vakiotyöstöarvot

HSM CAM -ohjelmistoon tehtiin seuraavaksi työkalukirjastot HAAS-koneistuskeskukselle ja -sorville. Työkalukirjastot rakennettiin vakiotyökalulistoihin kerättyjen tietojen pohjalta. Työkalukirjastot päätettiin nimetä työstökoneiden mukaan, mutta niitä voisi ryhmitellä esimerkiksi työkaluryhmien mukaisesti, kuten porat, jyrsimet tai kierretapit.

Seuraavaksi päätettiin etsiä terävalmistajien ilmoittamat lastuamisarvosuositukset, jotka sitten lisättiin työkalukirjastoihin. Työkalukirjastojen luominen nopeuttaa varsinaista CAM-ohjelmointia, koska työkalujen mittatietoja ja lastuamisarvoja ei tarvitse joka kerta etsiä uudelleen valmistajan antamista tiedoista. Lastuamisarvot tulevat automaattisesti koneistusohjelmiin, kun ne ovat määriteltä työkalukirjastoihin. Tällä tavoin minimoidaan

myös koneistajalta kuluva aika lastuamisarvojen etsimisessä ja suunnittelussa. Näin olen koneistaja voi keskittyä itse koneistamiseen.

6.5 Postproessorin valinta

Ohjelmiston valintavaiheessa selvitettiin HSM CAM -ohjelmistossa olevia postproessoreita. Postproessorilista on nähtävillä Autodesk-sivustolla. Sivustolta pystyy myös näkemään, koska postproessoreita on viimeksi muokattu. Kävi ilmi, että HSM sisältää useamman geneerisen HAAS-ohjauksen postproessorin. (Autodesk Inc. 2018b). HAAS VF-4 koneistuskeskukselle valittiin ohjelmiston listalta HAAS-koneistuskeskuksille tarkoitettu geneerinen HAAS (pre-NGC) -postproessori. HAAS ST 30-Y -sorville valittiin puolestaan HAAS-sorveille tarkoitettu geneerinen HAAS Turning -postproessori. Lisäksi ohjelmistoon asennettiin Autodesk Inventor HSM -sivustolta löytyvä Haas ST30-Y sorvin ohjaukseen tarkoitettu Haas ST30-Y -postproessori.

6.6 Työstökoneiden kytkeminen ja yhteyden muodostaminen Ethernet-verkkoon

Haas-sorvi oli kytketty jo aiemmin Salomaan Konepajan Ethernet-verkkoon, mutta verkkoyhteys ei ollut toiminut palvelinpäivitysten myötä. Sorvin verkkoyhteysasetuksiin päivitettiin uusi palvelin, yhdyskäytävä sekä muut tarvittavat IP-osoitteet. Koneelle yhdistetyn verkkokansion sisältöä siistittiin ja luotiin alikansiot vanhoja ja uusia ohjelmia varten. Samalla otettiin uusi ohjelmien nimeämiskäytäntö voimaan, jossa ohjelman numero vastaa valmistettavan kappaleen tuotekoodia.

Haas-koneistuskeskusta ei ollut kytketty aiemmin Ethernet-verkkoon. Koneistuskeskuksessa on verkkoyhteysliitäntä valmiina, joten kytkemistä varten tuli hankkia vain tiedonsiirtoon sopiva verkkokaapeli. Koneistuskeskus kytkettiin RJ 45, CAT.6, 1 Gb Ethernet-verkkokaapelilla lähiverkkoon. Koneistuskeskukselle asetettiin verkkoyhteysasetuksiin yhteydenmuodostusoikeus ja määriteltiin tarvittavat IP-osoitteet ja palvelin. Samalla tehtiin alikansiojaot koneelle yhdistettyyn verkkokansioon.

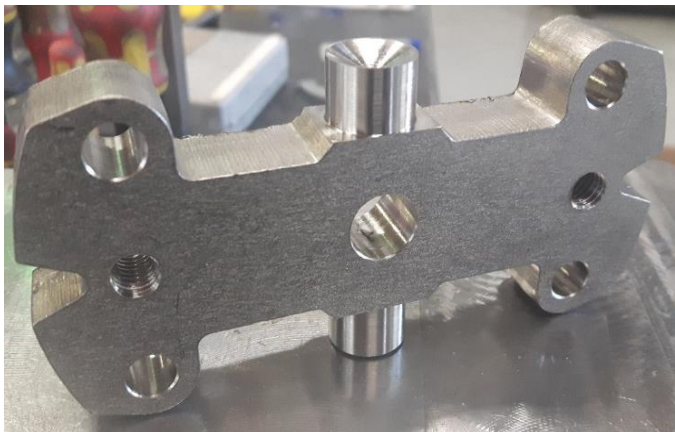
6.7 HSM CAM -ohjelmiston testaus ja tuotantokäyttö

Ohjelmiston asennuksen ja työkalukirjastojen teon jälkeen aloitettiin ohjelmiston testausvaihe. Salomaan Konepajan jo tuotannossa olevista koneistustuotteista valittiin koneistuskeskukselle ja sorville tuotteet, jotka mallinnettiin ja ohjelmoitiin HSM CAM:lla. CAM:lla luodut työstöradat käännettiin postprosessorilla työstökoneen käyttämäksi koodiksi. Käännettyjä NC-ohjelmia verrattiin jo olemassa oleviin ohjelmiin. Tällä tavoin voitiin varmistua postprosessorien kääntävän CAM-ohjelmalla tehdyt työstöradat ja muut määrittymiset oikeanlaiseksi NC-koodiksi juuri yrityksen käytössä oleville työstökoneille. Postprosessorien huomattiin kääntävän NC-koodia pääasiallisesti oikein pieniä poikkeuksia lukuun ottamatta. Käännettyjä NC-koodeja jouduttiin hieman korjaamaan HMS Editor -ohjelmalla. Näitä poikkeuksia käsitellään lisää tämän työn Lopuksi-luvussa.

Seuraavassa testausvaiheessa ohjelmistolla mallinnettiin kappale (Kuva 6. & 7.) valmistettavaksi HAAS VF4 -koneistuskeskuksella. Testisarja suoritettiin 4-akselisena työstönä.



Kuva 6. Testikappaleen aihio.



Kuva 7. Valmis testikappale.

Kappaleen aihio tilattiin laser-leikkeenä ruostumattomasta teräksestä, johon tuli jyrsiä akselitappi molemmille puolille kappaletta h7-toleranssilla. Kappaleen läpi porattiin reikiä ja tehtiin kierteitä valssaavalla kierretapilla. Lisäksi koneistuskeskuksella suoritettiin kolme muuta testiohjelmia, jotka olivat käytössä myös sarjatuotannossa.

HAAS ST30Y -sorvilla suoritettiin yhteensä neljä testiohjelmaa, joista kaikki olivat käytössä myös sarjatuotannossa. Testiohjelmien suoritusten aikana muokattiin työstöarvoja ja työkalukompensaatioita, joiden avulla saavutettiin optimaalinen työstönopeus ja toleranssialueet. CAM-ohjelmiston avulla tehtyjen ohjelmien käytöllä saatiin koneistajien työaikaa vapautumaan tuotantotöihin.

Lopuksi HSM CAM -ohjelmiston toimivuutta haluttiin vielä testata Goodway-sorvilla, jossa on Fanucin ohjaus. Goodwaylle tehtiin kahdelle tuotteelle ohjelma HSM CAM -ohjelmistolla. CAM-ohjelman kääntämiseen valittiin HSM-ohjelmistosta vakiona löytyvä geneerinen Fanuc-postprosessori. Ohjelmat kääntyivät pieniä poikkeuksia lukuun ottamatta oikein. Tehdyt ohjelmat vaativat muutaman G-käskyn muuttamisen juuri kyseisen Goodwayn Fanuc-ohjaukseen sopivaksi, jonka jälkeen ne voitiin ottaa tuotantokäyttöön.

7 PROSESSIN KUVAUS

Salomaan Konepaja on sertifioitu SFS-EN ISO 9001:2015 laatu järjestelmästandardin mukaisesti. Standardisoimisliiton mukaan johdonmukaiset ja ennustettavissa olevat tulokset saavutetaan tehokkaammin, kun toimintoja käsitellään ja hallitaan toisiinsa liittyvinä prosesseina, jotka toimivat yhtenäisenä järjestelmänä (Suomen Standardisoimisliitto SFS 2016). Tämä velvoittaa yritystä tekemään uudesta tai muuttuneesta tuotantoprosessista prosessikuvauksen.

CAD/CAM-prosessikuvauksen pohjana päädyttiin käyttämään yrityksen yleistä prosessikuvausmenetelmää, jota on käytetty myös muissa SFS-EN ISO 9001:2015 laatu järjestelmästandardin vaatimissa prosessikuvauksissa. Kaaviossa 1, sivulla 33 esitetään Salomaan Konepajalle tehty CAD/CAM-prosessin yleiskuvaus. CAD/CAM-prosessikuvauksen sisältöä käydään tarkemmin läpi tämän luvun alaotsikoiden alla.

7.1 Asiakas – myynti – asiakas

Prosessi käynnistyy, kun asiakas tekee tarjouspyynnön. Myynti suorittaa teknisen katselmuksen, selvittää materiaalien saatavuuden, koostaa tuotteelle tuoterakenteen ja hinnoittelee sen. Suunnittelija/CAM-ohjelmoija osallistuu myyntivaiheeseen tarpeen mukaan antaen arvion esimerkiksi teknisistä vaatimuksista, koneistusajasta tai työkalukustannuksista tarjouslaskentaa varten. Myynti vastaa asiakkaan tarjouspyyntöön tekemällä tarjouksen tai kieltäytyy tarjoamasta tuotetta perusteltujen syiden vuoksi. Jos tarjous päädytään tekemään, voi asiakas joko hyväksyä tai hylätä sen. Tässä vaiheessa asiakkaan päätös määrittää jatkuuko prosessi eteenpäin. Prosessi päättyy, jos asiakas päätyy hylkäämään tarjouksen. Asiakkaan hyväksymä tarjous puolestaan jatkaa prosessia varsinaiseen CAD/CAM-ohjelmointiin.

7.2 CAD/CAM-ohjelmointi – postprosessointi – tiedonsiirto

Asiakkaan hyväksymä tarjous käynnistää CAD/CAM-ohjelmoinnin. Suunnittelija tai CAM-ohjelmoija 3D-mallintaa tarvittaessa koneistettavan kappaleen. Asiakkaan vastuulla on lähettää tuotedokumentaatio ja tekniset vaatimukset 3D CAD-mallinnusta ja

CAM-ohjelmointia varten. 3D-mallinnuksen jälkeen CAM-ohjelmoija valitsee työhön tarvittavat työkalut, määrittää työkierron ja työstöarvot sekä simuloi ohjelman. Simuloimalla suoritetaan törmäystarkastelu ja saadaan arvio työstöajasta. Työstöaikaa voidaan vielä yrittää parantaa muuttamalla työstöratojen järjestystä tai asetuksia.

Lopuksi CAM-ohjelmoija kääntää CAM-ohjelman postprosessorilla NC-tiedostomuotoon ja tekee tuotteelle asetusohjelehdin. Tehty NC-ohjelma aukeaa automaattisesti HSM CAM Editor -ohjelmaan ja sitä voidaan vielä tässä vaiheessa muokata tai tarkistaa. Tämän jälkeen ohjelma tallennetaan työstökoneelle jaettuun verkkokansioon. Ohjelma on suoraan valittavissa työstökoneelta käsin, eikä tiedonsiirtoon tarvita muita toimenpiteitä.

7.3 Koeajo ilman kappaletta – testikappale – tuotanto

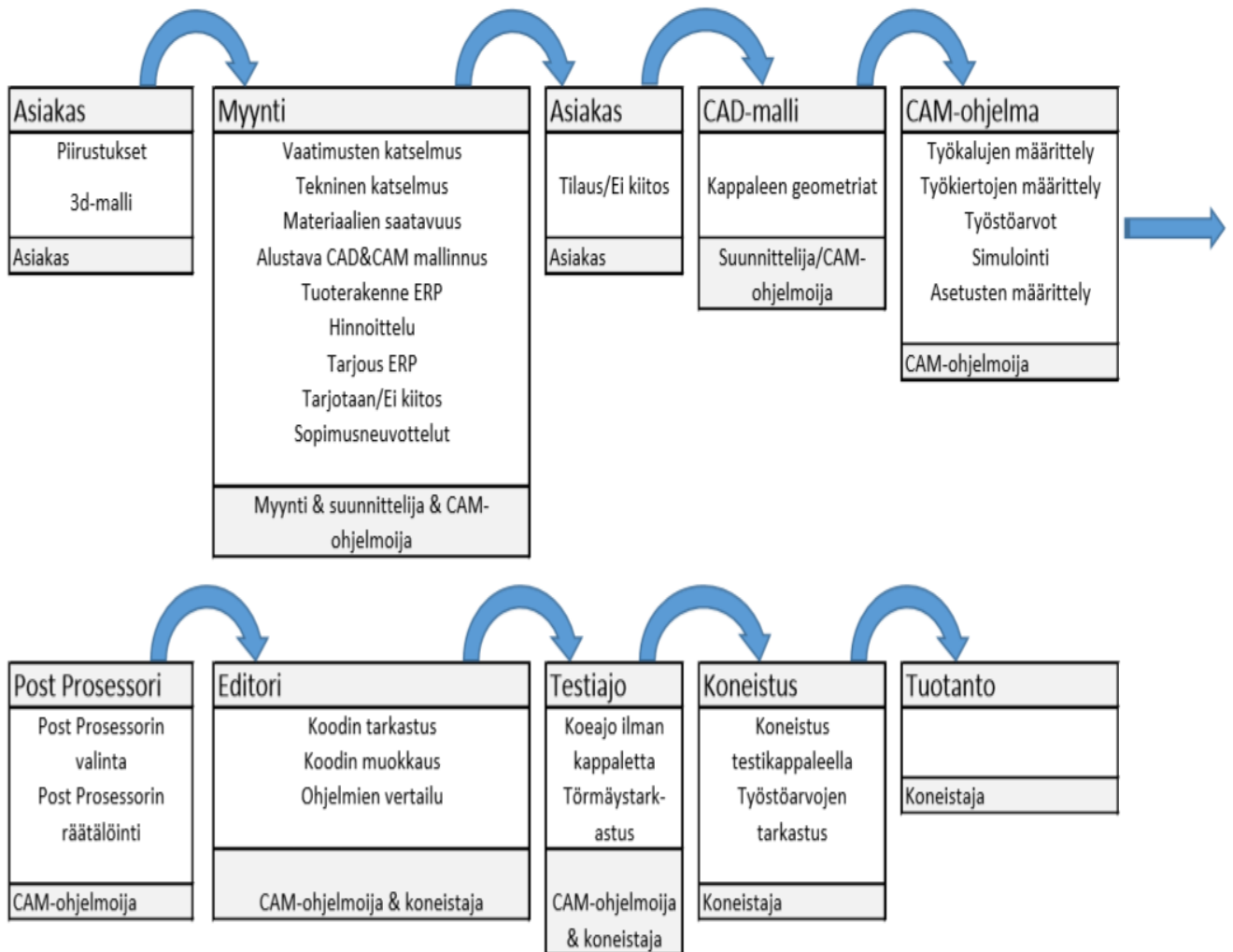
Tiedonsiirron jälkeen koneistaja suorittaa työstökoneella ohjelman testiajon ilman kappaletta. Onnistuneen testiajon jälkeen koneistetaan testikappale ja samalla tarkistetaan optimaaliset työstöarvot sarjatuotantoa varten. Testikappale mitataan ja tarkistetaan. Koneistaja antaa palautetta CAM-ohjelmoijalle ohjelman suorittamisesta. Koneistaja mittaa kappaleelle työstöajan, jonka perusteella määritetään esimerkiksi sarjatuotannossa valmistukseen kuluva kokonaisaika tuotannonsuunnittelua varten. Kappale siirtyy tuotantoon, kun testikappale täyttää tuotteelle asetetut tekniset vaatimukset.



**Salomaan
Konepaja**

CAD/CAM-prosessi

Tehnyt: 10.10.2018/SJ
Hyväksynyt: 14.10.2018/PK



Kaavio 1. CAD/CAM-ohjelmoinnin prosessikuvaus Salomaan Konepajassa.

8 LOPUKSI

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli kehittää ja yhtenäistää Salomaan Konepajan koneistettavien kappaleiden tuotantoprosessia. Työn lopullisena tuloksena syntyi kappaleessa 7 esitetty CAD/CAM-prosessikuvaus. Ohjelmiston käyttöönoton myötä saavutettiin uusien koneistustuotteiden nopeampi tuotannon aloitus ja läpimenoaika. Ohjelmistolla tehdyt ohjelmat ja asetusohjeet vapauttivat koneistajien työaikaa jo tuotannossa olevien koneistustöiden tekemiseen. Näin ollen tilauskannassa olevia tuotteita saatiin nopeammin valmistettua.

Kehitystä lähdettiin hakemaan 3D CAD/CAM -ohjelmiston käyttöönotolla. Lisäksi koneistusprosessia tehostettiin muun muassa vakioimalla koneistustöissä käytettäviä työkaluja ja kiinnittimiä. Koneistusohjelmien nimeäminen ja varmuuskopiointi haluttiin suorittaa yhtenäisellä tavalla samaan paikkaan. Lopuksi molemmat ohjelmistoon liitettävät työstökoneet tuli yhdistää yrityksen Ethernet-verkkoon.

Käyttöönotto eteni odotetusti ja suunnitellussa aikataulussa pysyttiin. Voidaan todeta, että 3D CAD/CAM -ohjelmiston käyttöönotto sujui ilman suurempia ongelmia. Ohjelmiston toimivuutta testattiin tuotantokäytössä, ja sillä saatiin aikaiseksi toimivia koneistusohjelmia. Testausvaiheessa huomattiin geneeristen postprosessorien kääntävän NC-koodia pääasiallisesti oikein.

Haas-koneistuskeskukselle tehdyissä testiohjelmissa ei ilmennyt virheitä NC-koodissa. Haas-sorville tehdyissä testiohjelmissa löytyi pieniä poikkeamia, jotka editoitiin pois ennen varsinaista tuotantokäyttöä. Poikkeamat eivät kuitenkaan vaikuttaneet oleellisesti ohjelman oikeellisuuteen. Näitä poikkeamia olivat esimerkiksi Haas-sorvin kärkipylkän taaksepäin vedon M-koodin automaattinen tulostuminen ohjelmaan, vaikka kärkipylkkä ei ollut valittuna HSM-ohjelmiston puolella käytettäväksi.

Tulevaisuudessa postprosessoreja tulee päivittää ja räätälöidä. Postprosessorien päivityksiä ja muutoksia tulee seurata aktiivisesti Autodeskin HSM CAM -sivustolta. Henkilökuntaa tulee kouluttaa käyttämään ohjelmistoa, koska osaamisen myötä ohjelmiston tehokkuus paranee eikä käyttäminen ole kiinni yhden työntekijän panoksesta. Lisäksi kentätasolla oleva hiljainen tieto ja palaute olisi saatava tuotannonjohdolle asti.

3D CAD/CAM -ohjelmiston käyttöönoton myötä Salomaan Konepajalla on mahdollisuus jatkokehittää tämän opinnäytetyön jälkeen koneistusprosesseja. Autodesk Inventor -suunnitteluohjelmistoon on saatavilla lisäosia, joilla voi suunnitella esimerkiksi robotisolun työstökoneen yhteyteen. Ohjelmiston avulla voidaan tehdä esiselvityksiä sekä mallintaa ja simuloida konfiguraatioita eri vaihtoehtojen esille saamiseksi. Robotisolun avulla saavutetaan enemmän miehittämätöntä työstöaikaa. Lisäksi HSM CAM -ohjelmistosta löytyy 2D-profiileille nestaus ja leikkaustyökierrot vesisuihku-, plasma- ja laserleikkausta varten.

Haas-työstökoneilla on puolestaan monipuoliset mahdollisuudet miehittämättömän työn seurantaan ja valvontaan langattoman yhteyden kautta. Haas next generation -ohjaus ja langaton verkkoyhteys mahdollistavat esimerkiksi hälytysviestin lähetyksen matkapuhelimeen, jos työkalulle asetut työstörajat ylittyvät. Nämä seikat huomioiden mahdollisuuksia jatkokehitykseen on monia.

LÄHTEET

Autodesk HSM. 2018b. The Autodesk HSM NC Editor. Viitattu 19.11.2018 <https://knowledge.autodesk.com/support/hsm/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/ENU/Inventor-HSM/files/GUID-162B0E73-74AD-4653-A934-3EADC306A902-htm.html>

Autodesk HSM. 2018a. Youtube: Get started with Inventor HSM. Viitattu 28.10.2018 <https://www.youtube.com/watch?v=gvdqKvPLDok>

Autodesk Inc. 2018b. Posts. Viitattu 7.10.2018. <https://cam.autodesk.com/hsmposts>

Autodesk Inc. 2018a. Inventor products. Viitattu 7.10.2018. <https://knowledge.autodesk.com/support/inventor-products/learn-explore/caas/sfdcarticles/sfdcarticles/System-requirements-for-Autodesk-Inventor-2019.html>

Groover, Mikell P. 2016. 4 painos. Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing. Harlow: Pearson Limited.

Haas Automation Inc. 2018b. CNC Lathes. Viitattu 8.9.2018 http://int.haascnc.com/mt_spec1.asp?intLanguageCode=1033&id=ST-30Y&webID=YAXIS_LATHE

Haas Automation Inc. 2018a. CNC Verticals. Viitattu 8.9.2018 http://int.haascnc.com/mt_spec1.asp?intLanguageCode=1033&id=VF-4&webID=40_TAPER_STD_VMC

Haas automation inc. 2018. Lathe operator's manual. Viitattu 8.9.2018. https://diy.haascnc.com/sites/default/files/Locked/Manuals/Operator/2018/96-8910_Rev1_Lathe_Operators_Manual_NGC_English.pdf?0=%253F2882

Haas automation inc. 2015. Mill series programming workbook. Viitattu 8.9.2018. https://diy.haascnc.com/sites/default/files/Locked/3/Mill_Programming_Workbook.pdf

HSM Advisor. 2009-2018. Notepad++: Absolutely Free G-Code Editor With Code Highlighting. Viitattu 18.11.2018 https://zero-divide.net/?shell_id=151&article_id=4809_notepad-absolutely-free-g-code-editor-with-code-highlighting

IEEE GlobalSpec 2018. Engineering360. 3D Scanners Information. Viitattu 28.10.2018 https://www.globalspec.com/learnmore/manufacturing_process_equipment/inspection_tools_instruments/3d_scanners

In-House Solutions 2018. Products. <https://www.inhousesolutions.com/how-to-get-the-best-mastercam-post-processor/>

Jokinen, T. 2010. Tuotekehitys. Aalto yliopisto. Teknillinen korkeakoulu. Viitattu 26.10.2018 <http://lib.tkk.fi/Reports/2010/isbn9789526033204.pdf>

Mastercam 2018b. Tuki ja tiedostot. Viitattu 7.10.2018. http://mastercam.fi/?page_id=4346

Mastercam 2018a. Tuotteet. Viitattu 23.9.2018 http://mastercam.fi/?page_id=3462

- Mercer, T. 2000. CAD/CAM selection for small manufacturing companies. University of Wisconsin. Tutkielma. Viitattu 7.8.2018. <http://www2.uwstout.edu/content/lib/thesis/2000/2000mercercert.pdf>
- Mustonen M, & Pikkarainen E. 2010. Numeerisesti ohjatut työstökoneet. 2. painos. Tampere: Opetushallitus.
- Neopoint Oy 2018. Laserkeilausteknologia. Viitattu 28.10.2018 <http://www.neopoint.fi/fi/laserkeilaus>
- Polyga. 2018. Polyga's Latest Guide: 3D Scanning 101 – How Structured-Light 3D Scanners Work. Viitattu 18.11.2018 <https://www.polyga.com/blog/polygas-latest-3d-scanning-101/>
- Renishaw plc. 2001 – 2018. Machine tool probes and software. Viitattu 7.10.2018. <http://www.renishaw.com/en/machine-tool-probes-for-component-setting-and-inspection--6075>
- Salomaa E. Haastattelu 6.6.2018. Viitattu 10.6.2018.
- Salomaan Konepaja Oy 2018b. Etusivu. Viitattu 17.8.2018 <http://www.salomaankonepaja.fi/>
- Salomaan Konepaja Oy 2018a. Historia. Viitattu 17.8.2018 <http://www.salomaankonepaja.fi/yritys/historia>
- Salomaan Konepaja Oy 2018d. Laatu. Viitattu 18.8.2018 <http://www.salomaankonepaja.fi/terasrakennestandardi>
- Salomaan Konepaja Oy 2018c. Ympäristöpolitiikka. Viitattu 18.8.2018 <http://www.salomaankonepaja.fi/yritys/ymparistopolitiikka>
- Seitamaa-Hakkarainen, P. Suunnitteluprosessien teoriaa. Verkkomoniste. Viitattu 28.10.2018 http://www.mlab.uiah.fi/polut/Design/teoria_suunnitteluprosessit.html
- Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 2016. Laadunhallinnan periaatteet. Perusta ISO 9000 -sarjan laadunhallintajärjestelmästandardeille. Viitattu 4.11.2018 https://www.sfs.fi/files/8179/Laadunhallinnan_periaatteet_2016-09_2_palstalla_VIIMEISIN.pdf
- Shannon, R. 1998. Introduction to the art and science of simulation. Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference. Viitattu 26.10.2018 <http://cecs.wright.edu/~fcjar-all/ISE195/Readings/ShannonSimulationART.pdf>
- Tuhola, E. & Viitanen, K. 2008. 3D-mallintaminen suunnittelun apuvälineenä. Tampere: Tammertekniikka.
- Valuatlas oppimateriaalit. 2009. CAD/CAM perusteet ja muottien työstäminen. Viitattu 7.8.2018. http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/machining_milling_FI.pdf
- Vesamäki H. 2007. Lastuavan työstön NC-ohjelmointi. 3. uudistettu painos. Helsinki: Teknologiainfo Teknova.